

УДК 621.002.3 (075.8)

Ф.И. Яковлев, д-р техн. наук,
В.П. Маршуба, канд. техн. наук

Украинская инженерно-педагогическая академия,
г. Харьков

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОТПУСКА НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Fe – Ni - Al

Представлены результаты экспериментов по определению влияния режимов отпуска на магнитные свойства сплавов на основе Fe-Ni-Al. При использовании результатов, полученных в ходе проведения опытов по определению оптимальных режимов отпуска, возможно управление процессом формирования магнитных свойств этих сплавов, что позволяет повысить эксплуатационную надежность изделий, а также продуктивность труда при их производстве.

Введение. Магнитотвердые материалы получили широкое применение для производства постоянных магнитов. Их важной характеристикой является максимальная удельная магнитная мощность. При размагничивании она изменяется от нуля до максимального значения и соответствует половине произведения значения остаточной индукции B_r на коэрцитивную силу H_c . После снятия внешнего магнитного поля магнитные свойства сплавов характеризуются кривой размагничивания. Как намагничивание сплавов, так и размагничивание связаны с одними и теми же процессами: смещением доменной степени и вращением векторов намагничивания, появление которых обусловлено формой кристаллов. Так, например: сплавы железа с кобальтом, никелем и другими легирующими элементами кристаллизуются с образованием кубической ре-

шётки и имеют оси хорошего, среднего и плохого намагничивания. Известно, что в условиях эксплуатации имеет место неизбежное колебание магнитных свойств, и так как эти процессы намагничивания и размагничивания не совпадают из-за их необратимости, то при перемагничивании сплава появляется петля гистерезиса. Кроме этого, от исходной структуры сплавов существенным образом зависит магнитострикция. Известно, что в условиях эксплуатации имеет место неизбежное колебание температуры, и, как следствие, под воздействием колебания температуры и воздействия ударных и вибрационных нагрузок могут изменяться свойства сплавов. На этом основании свойства магнитотвердых материалов в условиях эксплуатации изделий оценивают по возможным изменениям структуры сплава из-за неизбежного колебания температуры, а также и от воздействия ударной и вибрационной нагрузок. В случае изменения магнитных свойств от ударных и вибрационных нагрузок их можно восстановить повторным намагничиванием. Структурные изменения сплавов не устраняются, поэтому их структурная нестабильность ограничивает их применение. Следовательно, чтобы расширить область применения магнитотвердых материалов, очень важно в процессе их термической обработки получить структуру сплава, устойчивую к неизбежным колебаниям температуры в условиях эксплуатации. Устранить возможное изменение структуры в условиях эксплуатации, можно, видимо, только путем применения оптимального режима отпуска, обеспечивающего получение равновесной структуры сплава после его закалки. Поэтому необходимо определить оптимальную температуру отпуска и его продолжительность выдержки, так как это имеет известное практическое значение.

Анализ последних исследований и публикаций. Состав, условия производства и свойства магнитотвердых сплавов на основе Fe-Ni-Al регламентируются требованиями ГОСТа*. Однако зависимость изменения магнитных свойств от температуры отпуска и его продолжительности выдержки для указанных сплавов ГОСТом не регламентируется. Формирование магнитных свойств сплавов во многом определяется режимом отпуска. Следовательно,

установление оптимальной температуры отпуска и продолжительности выдержки при данной температуре имеет известное эксплуатационное значение.

Для обеспечения заданных магнитных свойств сплавов, предусмотренных ГОСТом, их подвергают термической обработке, которая осуществляется в магнитном поле достаточно высокой напряженности. Однако необходимо отметить, что сплавы Fe-Ni-Al получают методом литья. Но, как известно, в отливках не исключено возникновение пористости, незначительного количества неметаллических включений и других литейных дефектов. На этом основании можно отметить, что режимы термической обработки, предусмотренные ГОСТом, не позволяют постоянно получать требуемые магнитные свойства сплавов. Данный фактор послужил основой для проведения исследований.

Цель исследований – установление оптимальной температуры отпуска и его максимальной продолжительности выдержки для магнитотвердых сплавов на основе Fe-Ni-Al, то есть получения структуры сплава, устойчивой к неизбежным колебаниям температуры в условиях эксплуатации. На основе найденных закономерностей термической обработки магнитотвердых материалов – разработать научно обоснованные рекомендации применительно к производству деталей из этих сплавов.

Изложение основного материала. Для определения оптимальной температуры отпуска и его продолжительности выдержки проведены исследования на стандартных образцах-кольцах, изготовленных из сплава марки ЮН15ДК25БА. Термическая обработка сплава марки ЮН15ДК25БА осуществлялась по режиму: температура закалки 1080° С, охлаждение в магнитном поле напряженностью 200 кА/м от 1080 до 850° С со скоростью 200° С/мин, а от 850 до 550° С - со скоростью 25° С/мин. С последующим отпуском при температуре 550, 600 и 650° С в продолжение 5, 10 и 15 часов по каждому из режимов отпуска обрабатывались по 5 образцов-колец. Магнитные свойства определяли по стандартной методике.

В литом состоянии сплав ЮН15ДК25БА имеет ферромагнитную основу с неферромагнитными включениями β -фазы и интерметаллидными включениями

типа: Fe_2Ti ; FeTi ; FeAl_3 ; CuAl_2 и др. В этих условиях значение коэрцитивной силы H_C определяется константой кристаллической анизотропии ферромагнитной основы K , объемом неферромагнитных включений β фазы и количеством указанных выше интерметаллидных включений. Отсюда очень важно, чтобы при температуре закалки осуществлялся полный переход неферромагнитных включений β -фазы с образованием - β_1 и β_2 -фаз, а при последующем охлаждении была возможность получения однодомных кристаллов ферромагнитной β_1 -фазы, которая имела бы пластинчатую форму кристаллов, обеспечивающих большие значения H_C , B_r и ω_{\max} .

Немаловажное значение на формирование магнитных свойств сплава имеют и условия нагрева образцов-колец до температуры закалки 1080°C . Эту зависимость исследовали путем нагрева образцов-колец с печью от температур 20 и 600 до 1080°C , а также с предварительно нагретой печью до температуры 1080°C . С температуры закалки все образцы-кольца подвергались ступенчатому охлаждению в магнитном поле по режимам, указанным выше. Полученные результаты исследований сведены в таблицу.

*Магнитные свойства сплава ЮН15ДК25БА
после закалки и отпуска*

Режим термо- обработки об- разцов	Режим от- пуска		(ВН)max, кДж/м ³	H _C , кА/м	Br, Тл	Тип кри- сталли- ческой структу- ры
	T°, C	τ, час				
Нагрев образцов-колец с печью до 1080° C						
1	550	15	60	70	1,32	столбча- тая
2	600	10	66	77	1,37	
3	650	5	73	86	1,41	
Нагрев образцов-колец с печью от 660 до 1080° C						
1	550	15	58	67	1,30	столбча- тая
2	600	10	63	74	1,32	
3	650	5	69	82	1,38	
Нагрев образцов-колец в печи нагретой до 1080° C						
1	550	15	55	62	1,20	столбча- тая
2	600	10	60	67	1,26	
3	650	5	64	73	1,31	

Анализ экспериментальных данных, приведенных в таблице, показывает, что образцы-кольца после термической обработки по режиму: нагрев от 20 до 1080° С, с последующим ступенчатым охлаждением от 850 до 1080° С со скоростью 200° С/мин, а с 850 до 500° С – со скоростью 25° С/мин и с последующим отпуском при температуре 550° С в продолжение 15 часов, в среднем имеют следующие значения магнитных свойств: $(BH)_{\max} = 60 \text{ кДж/м}^3$; $H_C = 70 \text{ кА/м}$; $B_r = 1,32 \text{ Тл}$. С повышением температуры отпуска на 50° С в условиях неизменных температуры закалки и способа охлаждения, даже с уменьшением длительности выдержки при отпуске на 5 часов, имеет место повышение магнитных свойств образцов-колец. Так, $(BH)_{\max} = 66 \text{ кДж/м}^3$; $H_C = 77 \text{ кА/м}$; $B_r = 1,37 \text{ Тл}$. Повышение магнитных свойств свидетельствует о том, что с ростом температуры отпуска от 550 до 600° С обеспечивается более полный распад высокотемпературных фаз с образованием магнитной β_1 -фазы. Кристаллы β_1 -фазы имеют пластинчатую форму. Размеры пластинок, хотя и незначительно, но увеличиваются по сравнению с отпуском при температуре 550° С.

Отпуск при температуре 650° С в продолжение 5 часов дает возможность получить наибольшие магнитные свойства. Так, из сопоставления величин магнитных свойств следует, что после отпуска по режиму №3 магнитная плотность увеличивается на - 13 кДж/м³ по сравнению с магнитными свойствами, полученными после отпуска по режиму №1, а коэрцитивная сила – на 16 кА/м. Немного меньше увеличивается величина остаточной индукции. Отсюда следует, что при нагреве образцов-колец с печью до температуры закалки оптимальным режимом отпуска является режим №3. Этот режим обеспечивает благоприятные условия для более полного дораспада высокотемпературных фаз с образованием β_1 -фазы, обладающей высокими магнитными свойствами.

Экспериментальные данные, приведенные в таблице, показывают, что в случае нагрева образцов совместно с печью от 600 до 1080° С имеет место уменьшение всех магнитных свойств образцов-колец по сравнению с нагревом образцов-колец совместно с печью от 20 до 1080° С. Такая зависимость, види-

мо, обусловлена несколько более ускоренным нагревом, что связано с уменьшением времени пребывания образцов в интервале температур фазовых превращений. Как следствие, процесс фазовых превращений в этих условиях не идет до конца и не осуществляет выравнивания состава β_1 и β_2 -фаз с помощью диффузии атомов элементов, входящих в химический состав сплава. Естественно, эти факторы могут оказывать влияние на формирование магнитных свойств. Но при этом нужно отметить, что с повышением температуры отпуска, даже при значительном сокращении его длительности выдержки, магнитные свойства образцов-колец увеличиваются. Следовательно, с ростом температуры отпуска происходит более полный дораспад высокотемпературных фаз и выравнивание химического состава β_1 -фазы, что и обеспечивает повышение магнитных свойств образцов-колец.

Как видно из таблицы минимальные магнитные свойства были получены после нагрева образцов-колец в предварительно нагретой печи до температуры 1080° С. Так, после отпуска по режиму №1 были получены такие магнитные свойства: $(BH)_{\max}=55$ кДж/м³; $H_C=627$ кА/м; $B_r=1,20$ Тл. Такое снижение свойств связано с отсутствием полного завершения фазового превращения ферромагнитной основы и особенно высокотемпературной β -фазы с образованием β_1 и β_2 -фаз, причём они менее однородны по химическому составу. В результате с отсутствием полного завершения фазового превращения ферромагнитной основы не удастся получить однодоменные кристаллы ферромагнитной фазы β_1 пластинчатой формы.

Известно, что после снятия внешнего магнитного поля магнитные свойства сплава характеризуются кривыми размагничивания. На этом основании построены кривые размагничивания исследованных образцов-колец. Так, на рис. 1 представлены кривые размагничивания образцов-колец, нагреваемых до температуры закалки с печью и последующими режимами охлаждения и отпуска, предусмотренные методикой проведения исследований.

Анализ проведенных кривых на рис. 1 показывает, что максимальное значение размагничивания имеет место при уменьшении H от 86 до 55 кА/м с ро-

стом B от нуля до 1,00 кА/М. При дальнейшем снижении H и увеличении B от 1,00 до 1,41 Тл величина размагничивания возрастает незначительно. Следовательно, максимальная удельная магнитная плотность тем больше, чем больше остаточная индукция, коэрцитивная сила и коэффициент выпуклости кривой размагничивания, который определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{BrH_c}.$$

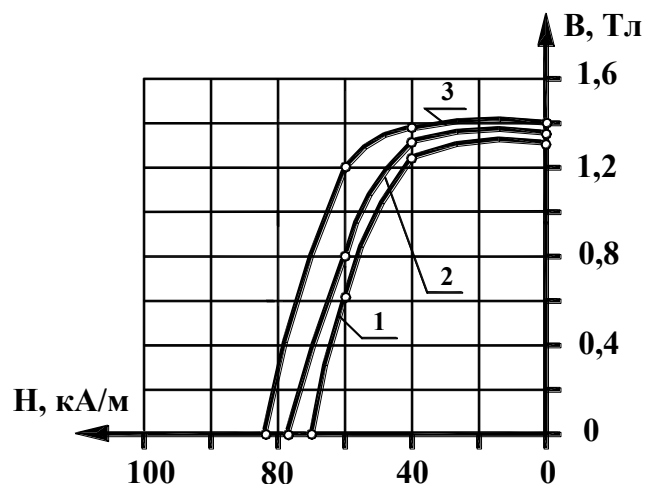


Рис. 1. Кривые размагничивания образцов-колец, нагреваемых с печью от 20 до 1080° С:

1 – отпуск по режиму № 1; 2 – отпуск по режиму № 2;
3 – отпуск по режиму № 3

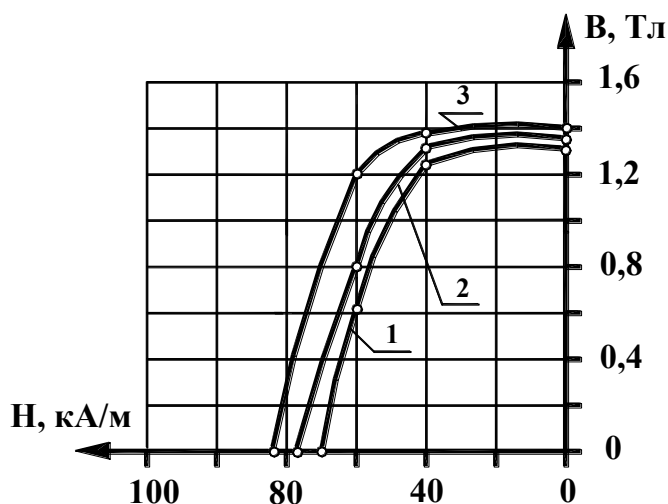


Рис. 2. Кривые размагничивания образцов-колец, нагреваемых с печью от 600 до 1080° С:

1 – отпуск по режиму № 1; 2 – отпуск по режиму № 2;
3 – отпуск по режиму № 3

Кривые размагничивания, представленные на рис. 2, показывают, что значение размагничивания зависит как от режимов отпуска, так и от способа нагрева образцов-колец до температуры закалки. Так, после отпуска образцов-колец по режиму №1 значения размагничивания минимальные. С повышением температуры отпуска наблюдается рост значений свойств размагничивания. В этих условиях максимальное значение свойства размагничивания получены после отпуска образцов-колец по режиму №3, однако даже при относительно высокой температуре отпуска 600°C приобретенные магнитные свойства даже меньше, чем свойства, полученные при отпуске по режиму №2 образцов-колец, нагреваемых совместно с печью до температуры закалки. При этом следует отметить, что форма кривых размагничивания образцов-колец, приведенных на рис. 2, несущественно изменяется по сравнению с формой кривых, показанных на рис. 1. Это свидетельствует о том, что сплав ЮН15ДК25БА с направленной кристаллизацией, полученной в результате термической обработки в магнитном поле, обладает высокими магнитными свойствами.

Кривые размагничивания, приведенные на рис. 3, показывают, что нагрев образцов-колец в предварительно нагретой печи до 1080°C связан с дальнейшим снижением всех магнитных свойств по сравнению с режимами нагрева, рассмотренными выше. При неизменных условиях нагрева образцов-колец до температуры закалки и последующего режима охлаждения магнитные свойства повышаются с ростом температуры отпуска. Наибольшие значения свойств размагничивания позволяет получить режим отпуска №3.

Следовательно, на основании рассмотренных экспериментальных данных, приведенных в таблице, и кривых размагничивания, показанных на рис. 1-3, можно отметить, что при разных способах нагрева образцов-колец до температуры закалки получение максимальных магнитных свойств обеспечивает режим отпуска №3. И в тех случаях, когда необходимо по условию эксплуатации изделия получить небольшие магнитные свойства заготовки для постоянных магнитов из сплава ЮН15ДК25БА, их необходимо нагревать совместно с печью до температуры закалки и подвергать отпуску по режиму №3. Если же ус-

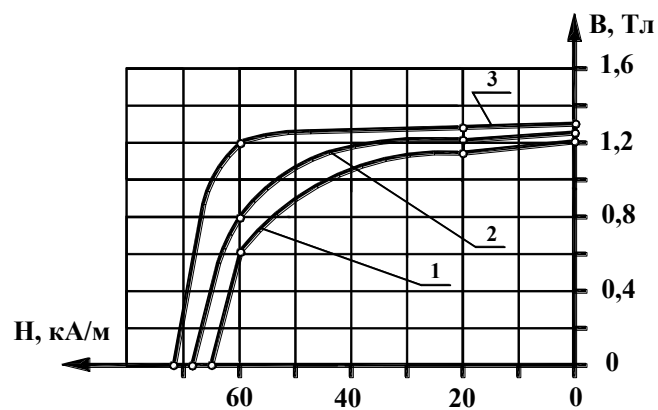


Рис. 3. Кривые размагничивания образцов-колец, нагреваемых в предварительно нагретой печи до 1080°C :
 1 – отпуск по режиму № 1; 2 – отпуск по режиму № 2;
 3 – отпуск по режиму № 3

ловия эксплуатации изделий не требуют для своей работы высоких магнитных свойств, то нагрев заготовок под закалку целесообразно осуществлять в предварительно нагретой печи до температуры закалки, а после - отпустить по режиму №3. Этот режим термической обработки дает возможность значительно сократить длительность процесса нагрева до температуры закалки, а следовательно, и термической обработки в целом, что обуславливает более высокую производительность.

Выводы

1. Термическая обработка в магнитном поле образцов-колец из сплава ЮН15ДК25БА способствует образованию кристаллов пластинчатой формы, обладающих большими магнитными свойствами.

2. Отпуск по режимам №2 и №3 дает возможность получать более однородную структуру, обладающую более равномерным распределением в кристаллах β_1 -фазы элементов, входящих в химический состав сплава, что значительно снижает возможность изменения структуры постоянных магнитов вследствие неизбежного колебания температуры в условиях эксплуатации.

3. Оптимальным режимом термической обработки, обеспечивающим получение максимальных свойств, является режим нагрева образцов-колец совместно с печью до 1080°C с последующим охлаждением в магнитном поле

напряженностью 200 кА/м с 1080 до 850° С со скоростью 200° С/мин, с 850 до 550° С со скоростью 25° С/мин и последующим отпуском при 650° С с продолжительностью выдержки 5 часов.

4. Наиболее производительным режимом термической обработки является режим: нагрев образцов-колец в печи, предварительно нагретой до температуры закали 1080° С, с последующими режимами охлаждения и отпуска, которые приведены в выводе №3.

Поступила в редакцию 22.11.03